

## СТАНОВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЕРМИ (памяти Валерия Дмитриевича Зимина)

П.Г. Фрик, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

### Для цитирования:

Фрик П.Г. Становление исследований турбулентности в Перми (памяти Валерия Дмитриевича Зимина) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 2. – С. 81–94. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.2.8>

Валерий Дмитриевич Зимин работал в лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН с момента ее основания в 1971 году до 1990 года и сыграл очень важную роль в формировании научной тематики лаборатории. В статье дается ретроспективный анализ работ лаборатории в области исследования турбулентных течений с упором на оригинальные идеи В.Д.Зимина, определившие направления работы лаборатории, развиваемые до сегодняшнего дня. К таким направлениям относятся иерархические и каскадные модели турбулентности, вейвлет-анализ самых различных физических систем, пространственно-временной анализ турбулентных потоков, исследование спиральных крупномасштабных вихрей и спиральной мелкомасштабной турбулентности.

**Ключевые слова:** турбулентность, модели турбулентности, вейвлет-анализ, крупномасштабная циркуляция, спиральность.



**ЗИМИН**  
Валерий Дмитриевич  
(11.09.1941 – 22.12.2019)

Родился в ст. Клетская Волгоградской области. В 1965 г. окончил физический факультет Пермского университета. Доктор физико-математических наук с 1984 г., с 1965 г. до 1967 г. – служба в армии. С 1967 г. – преподаватель Пермского государственного университета. С 1971 г. – старший научный сотрудник, в 1986–1991 гг. – заведующий лабораторией физической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН. В 1989–1990 гг. – научный руководитель экспедиций «Тайфун 89» и «Тайфун 90» в тропическую зону Тихого океана на научно-исследовательском судне «Академик Королев». С 1984 г. – профессор Пермского государственного университета.

Работая в Перми, подготовил 8 кандидатов наук. Автор 75 научных статей, 4 патентов и 4 книг.

С 1991 г. работал в США, в университете Хьюстона на инженерно – механическом факультете научным сотрудником, с 1995 г. – профессором.

Область научных интересов – гидродинамика, гравитационная конвекция с приложениями к тропическим циклонам и реакторам, электровихревые течения, вейвлет-представление многомерных полей и изображений, вейвлеты в моделях турбулентности, применение оптических методов исследования в гидродинамике, некогерентные оптические процессоры.

К началу 70-х годов в Перми турбулентностью не занимался никто, а первый интерес к ней был обусловлен запросами на выполнение договорных работ, побудившими Е.М. Жуховицкого формулировать «турбулентной темы» одному из своих аспирантов. К этому времени в «Перми на фронтах» гидродинамической устойчивости уже сражался небольшой батальон хорошо подготовленных бойцов, и идея закрыть всю турбулентную брешь силами одного, пусть даже очень одаренного и упорного, аспиранта, говорит о сильной недооценке масштаба задачи. На «амбразуру» в 1973 году был брошен Г. Файнбург, которому была поставлена задача построения **полуэмпирических моделей** для расчета **свободноконвективных турбулентных течений**. Перипетии этой драматической истории описаны в воспоминаниях основного действующего лица (Г.З. Файнбург, воспоминания о Е.М. Жуховицком в сб. «Конвективные течения», 2003), который, проделав огромную подготовительную работу, был вынужден переключиться на задачи вентиляции шахт (тоже турбулентные потоки, но совсем в другом контексте). Результатом разработки полуэмпирических подходов стали первые численные расчеты турбулентных конвективных течений (Bayandin et al., HTSR, 1991). Наиболее масштабной задачей этого направления стала задача о конвекции в подземных резервуарах газонефтепродуктов, подробно описанная в книге (Казарян и др., 2008).

Первые весомые «турбулентные результаты» получили в Перми экспериментаторы, занимавшиеся надкритическими конвективными течениями. В это время набирало обороты всеобщее увлечение «аттракторостроением» (построением странных аттракторов динамических систем), в котором задачи свободной конвек-

ции занимали особое место, и пермская школа конвекции в стороне остаться не могла. Не касаясь задач устойчивости и малоразмерного хаоса, отметим пионерские экспериментальные работы по исследованиям **турбулентной конвекции в замкнутых областях**, инициатором и локомотивом которых стал молодой кандидат наук **Валерий Дмитриевич Зимин**.

Сначала были надкритические течения в кубе (Зимин, Кетов, МЖГ, 1974; Зимин, Шайдуров, 1975). Экспериментальные исследования надкритических течений в коротком горизонтальном цилиндре (Богатырев, Гилев, МЖГ, 1980) и желание разобраться с их непростой временной динамикой привели В.Д. Зимины к идее рассмотрения пространственно-временных спектров течений, приведшей в работе (Богатырев, Гилев, Зимин, Письма в ЖЭТФ, 1980) к обнаружению последовательности выделенных частот (в обиходе – «Зиминские циклы»), отличающиеся квадратичной зависимостью частоты от номера пика в спектре). Подобные серии выделенных частот были обнаружены в целом ряде конвективных и МГД-течений, причем не только в надкритических, но и в развитых турбулентных течениях (все данные были собраны в препринте ИМСС Баранников, Богатырев, Зимин и др., 1982). В. Зимин предпринял попытки найти подобные закономерности в последовательности описанных наблюдателями циклов солнечной активности. Все эти результаты были обобщены в книге В.Д. Зимины и П.Г. Фрика (1988).

Исследование конвекции в кубе имело длительное продолжение и не завершилось и по сей день. Стоит отметить, что исследования турбулентной конвекции давно стали самостоятельной областью, в которой заняты очень сильные коллективы в разных странах. Однако основные

усилия большинства групп изначально были направлены на изучение законов теплопереноса в турбулентной среде (зависимость числа Нуссельта от чисел Рейлея и Прандтля). Тепловые измерения в турбулентных режимах представляют собой сложную экспериментальную задачу, за которую в Перми никто не брался, и исследования были направлены больше на изучение структуры (в первую очередь крупномасштабной) возникающих турбулентных течений. Были изучены осредненные поля температуры и спектры пульсаций крупномасштабной моды при турбулентной конвекции в кубе при подогреве снизу (Зимин, Кетов, МЖГ, 1978) и при одновременном подогреве снизу и сбоку (Зимин, Фрик, Шайдуров, МЖГ, 1982). Стоит отметить, что на западе исследования крупномасштабной циркуляции (КМЦ), возникающей в замкнутых полостях на фоне конвективной турбулентности, начались лет на двадцать позже.

Активные исследования турбулентной конвекции в замкнутых областях возобновились в Перми в ИМСС в 2000-х гг. после появления современных комплексов полевых исследований скорости в прозрачных потоках. Причем инициированный В.Д. Зиминим интерес к динамике крупномасштабной циркуляции в турбулентных конвективных системах остается в центре внимания лаборатории физической гидродинамики по сегодняшний день. В лаборатории получены приоритетные результаты в части исследований динамики плавающего на фоне конвективной турбулентности погруженного тела (Попова и Фрик, МЖГ, 2003), обнаружения различных режимов крупномасштабной циркуляции при турбулентной конвекции в полостях с различной геометрией (Васильев, Фрик, Письма в ЖЭТФ, 2011), объяснения динамики спонтанных перебросов крупномасштабной циркуляции в кубе (Vasiliev et al., *Int. Com. Heat and Mass Transfer*, 2019), изучения особенностей крупномасштабной циркуляции при конвекции

в жидких металлах (Frick et al. *EPL*, 2015,

Васильев и др. Письма в ЖЭТФ, 2015; Khalilov et al. *Phys.Rev.Fluids*, 2018; Zwirner et al. *JFM*, 2020).

Отдельно стоит отметить работы по исследованию **турбулентных течений во вращающихся слоях**, имеющих различные геофизические приложения. Эта тематика появилась в Перми в конце 80-х годов в рамках сотрудничества ИМСС с Институтом космических исследований РАН (ИКИ) в части исследований физических механизмов генерации тропических циклонов, возглавляемых в ИКИ С.С. Моисеевым. В Перми были начаты лабораторные исследования процессов формирования циклонических вихрей во вращающихся системах. Великолепно поставленный и выполненный Г.П. Богатыревым эксперимент по изучению циклонического вихря, возникающего над нагретой областью во вращающемся слое (Богатырев, Письма в ЖЭТФ, 1990), положил начало длинной серии экспериментов в подобной постановке, ведущихся до сегодняшнего дня. Богатырев и Смородин (Письма в ЖЭТФ, 1996) изучили зависимость скорости вращения вихря от скорости вращения слоя, Богатырев и др. (ФАО, 2006) исследовали влияние геометрии полости, Баталов и др. (GAFD, 2010) изучали закономерности формирования дифференциального вращения во вращающемся неоднородно нагретом слое. Привлечение современных полевых методов реконструкции скорости позволили в деталях изучить возникающие в таком течении вторичные структуры (Баталов и др., МЖГ, 2007; Сухановский и др., *EuroPhysJ*, 2012; Сухановский и др. *Physica D*, 2016). Эксперименты по изучению условий возникновения выделенных циклонических вихрей в турбулентном конвективном слое без локализованной зоны нагрева (Зимин и др. *Chaos*, 1991) помогли построить физические модели генерации таких вихрей (Зимин и др. ДАН, 1989; Зимин и др. МЖГ, 1996; Левина, Моисеев, Письма в ЖТФ, 1998; Левина и др. *NPG*, 2000).

Роль пермской команды в изучении циклонов не ограничилась лабораторными экспериментами и их интерпретацией. Со-

трудничая с С.С. Моисеевым, невозможно было не заразиться его увлечением спиральностью и желанием разобраться со спиральными механизмами генерации крупномасштабных структур. Будучи научным руководителем организованной в рамках этой научной программы экспедиции 1989 года в тропическую часть Тихого океана, В.Д. Зимин инициировал первую попытку измерений крупномасштабной спиральности в реальных условиях формирования тропического циклона. Идея использования спиральности не только для объяснения механизмов генерации циклонов, но и для идентификации начальных стадий их формирования была развита в работах Левиной (ДАН, 2006), Левиной и Монгомери (ДАН, 2010, 2014). Важно, что и эта огромная исследовательская работа, появившаяся в Перми благодаря В.Д. Зимину, продолжается в лаборатории до сегодняшнего дня – упомянем лишь пару недавних работ по лабораторному моделированию атмосферной циркуляции (Evgrafova, ИЖМТ, 2019, Sukhanovskii, Boundary Layer Meteorology, 2020).

Возвращаясь в конец 70-х, нельзя не выделить еще одну оригинальную работу В.Д. Зимина, связанную с построением специального функционального базиса, наиболее точно соответствующего структуре турбулентного потока. Ключевая идея базиса состояла в использовании функций, локализованных и в физическом пространстве, и в пространстве Фурье. Идея была встречена научной общест­венностью с большой настороженностью и только личная поддержка А.М. Обухова, обратившего внимание на доклад Зимина на съезде по механике в Алма-Ате в 1980 году, позволила опубликовать и тем самым за столбить **«иерархическую модель турбулентности»** (В.Д. Зимин, ФАО, 1981).

К разработке этого подхода к описанию турбулентных потоков подключились Т. Шайдунова (модели конвективной и МГД-турбулентности), П. Фрик (модели двухмерной турбулентности – МГ, 1983), Н. Колпаков (иерархический базис для

спиральных полей). Изначально базис был задуман как альтернативный путь к численному описанию турбулентных течений. Именно в таком ключе он был использован для моделирования двумерной турбулентности с линейным трением (Микишев, Фрик, МГ, 1990) и для изучения особенности развития перемежаемости в идеальной двумерной МГД-турбулентности (Микишев, Фрик, МГ, 1989). Появление первых параллельных компьютеров позволило рассмотреть развитое иерархическое дерево с 5,5 млн вихрей, реализованное в центре параллельных вычислений Королевского технологического института в Стокгольме (Aurell et al., Physica D, 1994), воспроизводящее динамику инерционного интервала переноса энтропии в двухмерной турбулентности. Модель оказалась интересной с точки зрения понимания физических механизмов спектрального переноса, но конкурировать с прямыми численными методами при расчете любого реального течения не могла. История собственно иерархических моделей на этом завершилась, но «иерархическая деятельность» вывела пермяков на два активно развивающиеся по сегодняшний день направления: вейвлет-анализ турбулентных полей и каскадные модели турбулентности.

Слово **вейвлет** появилось в научной литературе в конце 80-х, а первый контакт пермяков с большим энтузиастом этой новой науки – Мари Фарж состоялся во время исторической паровой конференции 1990 года (международная конференция «Генерация крупномасштабных структур» прошла на теплоходе, движущемся из Перми в Москву). Поскольку иерархические базисы прямо попадали под определение вейвлетов, то контакт возник сразу и уже в конце того же года П. Фрик принял участие в конференции в Марселе, где работал «отец вейвлетов» А. Гроссманн.

Новая для пермяков идея *анализа* с помощью самоподобных функций легла на подготовленную почву. П. Фрик взял аспирантов (В. Захаров, и чуть позже,

Д. Галягин и Р. Степанов), нацеленных на использование и развитие методов вейвлет-анализа. В 1995 году, во время очередной Зимней школы по механике сплошных сред, был организован семинар по вейвлет-анализу с участием А. Гроссмманна, на котором состоялось знакомство с Д. Соколовым и А. Шукуровым (МГУ), учениками и коллегами Я.Б. Зельдовича. Эта встреча положила начало многолетнему плодотворному сотрудничеству, значительно расширившему круг решаемых в лаборатории физической гидродинамики задач в сторону исследования космических магнитных полей и теории МГД-динамо. Появилось много новых контактов с астрономами-наблюдателями.

Среди первых «вейвлетных» достижений можно отметить выполненный совместно с французскими астрономами вейвлет-анализ солнечной активности (Nesme-Ribes et al., CRASP, 1995; Frick et al., A&A, 1997), анализ хромосферной активности звезд (Frick et al., AstroPhys.J. 1997), климатической изменчивости (Baliunas et al., Geophys.Res.Let., 1997), анализ вариаций геомагнитного поля (Галягин и др., Доклады РАН, 1998; Галягин и др., Физика Земли, 2000). Работа с звездными данными велась в сотрудничестве с Гарвардским астрофизическим центром и потребовала разработки новых алгоритмов вейвлет-анализа (Frick, Grossmann, JMPH, 1998; Soon et al., AstroPhysJ.Let., 1999; Frick et al., new Astronomy, 2004; Baliunas et al., MNRAS, 2006).

Большой цикл работ по галактическому магнетизму, выполняемых в сотрудничестве с институтом радиоастрономии (г. Бонн), стартовал с работ по анализу спиральных структур галактики NGC6946 (Frick et al., MNRAS, 2000) и структуры фарадеевского небосклона (Frick et al., MNRAS, 2001a). Были разработаны вейвлет-методы спектрального и корреляционного анализа галактических изображений (Frick et al., MNRAS, 2001b) и методы вейвлет-томографии галактического магнитного поля (Stepanov et al., A&A, 2002).

Для анализа спиральных галактических структур впервые были применены анизотропные вейвлеты (Patrikeyev et al., A&A, 2006). Разработанные методы были использованы для исследования магнитных полей различных галактик (Stepanov et al., A&A, 2008; Tabatabae et al., A&A, 2013; Stepanov et al., MNRAS, 2014; Frick et al., A&A, 2016;). Одной из последних разработок этого направления является вейвлет-метод реконструкции данных многоканальных радиотелескопов (Frick et al., MNRAS Letters, 2010; Frick et al., MNRAS, 2011; Beck et al., A&A, 2012; Sun et al., Astronom.J. 2015). Развитие методов вейвлет-анализа подробно описано в обзоре Фрик и др., УФН, 2022.

**Каскадные модели турбулентности** (английское название **Shell models**), предложенные независимо А.М. Обуховым и Е. Лоренцом в начале 70-х годов, приобрели широкую популярность среди исследователей турбулентности в 90-х, после того, как было показано, что, несмотря на предельную простоту, они с удивительной точностью воспроизводят достаточно тонкие статистические свойства развитой турбулентности. Можно уверенно утверждать, что пермская школа наиболее последовательно продвигала эти модели как в период их очень непростого продвижения в турбулентные научные круги, так и после их широкого признания. Связь иерархической модели с каскадными моделями была показана уже в работе В. Зимины 1981 года.

В 1983 году была построена первая нелокальная каскадная модель, включающая взаимодействие всех масштабов со всеми, – такое построение удалось выполнить для двумерного случая (Фрик, МГ, 1983). Двумерная турбулентность замечательна наличием второго положительно определенного интеграла движения, который позволил избежать неоднозначности при построении модели. Это преимущество было использовано для написания модели двумерной МГД-турбулентности (Фрик, МГ, 1984) и двумерной конвективной турбулентности (Фрик, ПМТФ, 1986). Чисто

двумерные турбулентные течения реализовать невозможно и интересны они только для теории, однако двумерные модели удалось обобщить на широкий класс квазидвумерных турбулентных течений, возникающих в вертикальных щелях (Бараников и др., ПМТФ, 1988), горизонтальных неоднородно нагретых слоях (Аристов и Фрик, МЖГ, 1989), в том числе, вращающихся (Аристов и Фрик, МЖГ, 1988; Аристов и Фрик, ПМТФ, 1991), а также турбулентных слоях проводящей жидкости в магнитных полях (Аристов и Фрик, МГ, 1988, 1989).

В начале 90-х наиболее популярной каскадной моделью стала модель, получившая название GOY, замечательная тем, что у нее есть параметр, который определяет вид второго интеграла движения (первым является энергия). При этом интеграл может быть и знакопостоянным (типа энтропии), и закононеопределенным (в этом случае его предложили считать аналогом спиральности). Появление второго интеграла движения позволило снять неопределенность в построении моделей трехмерной турбулентности. К пермским достижениям 90-х можно отнести исследование законов скейлинга в классе каскадных моделей (Frick et al., PRE, 1995) и численной двумерной турбулентности (Babiano et al., PRE, 1995, 1997), построение каскадной модели МГД-турбулентности (Frick Sokoloff, PRE, 1998) и модели конвективной турбулентности (Ложкин, Фрик, МЖГ, 1998), исследование особенностей МГД-турбулентности при низких числах Прандтля (Ложкин и др., *Astronomical Journal*, 1999; Antonov et al., *Magnetohydrodynamics*, 2001), исследование особенностей поведения самих каскадных моделей (Frick et al., *EuroPhys Lett.*, 2000), построение каскадной модели для турбулентности в жидком ядре Земли (Фрик и др., ДАН, 2003). Как некий компромисс между каскадными и иерархическими моделями была построена модель на бинарном дереве (Aurell et al., PRE, 1997).

В 2000-х в Россию пришли компьютерные кластеры и возникла идея их использо-

вания для расчета статистических характеристик на ансамбле реализаций решений каскадных уравнений со случайными начальными условиями (Антонов и др., ДАН, 2000). Сегодня эта методика стала стандартной при проведении численных экспериментов с каскадными моделями.

Нашей команде принадлежит и идея **каскадно-сеточного метода**, впервые сформулированная в работе (Frick et al., *EPL*, 2002) на примере задачи о конвекции в сферической оболочке. Для крупномасштабной конвекции использовались численные методы решения уравнений Буссинеска, в которых турбулентная вязкость определялась из решений каскадных уравнений. Идея сопряжения каскадных уравнений с уравнениями для крупномасштабных полей была реализована и в простой модели альфа-квадрат динамо (Соколов, Фрик, Астр.Ж., 2003). Такая комбинированная модель была развита и использована для исследования разнообразных режимов динамо в широком диапазоне управляющих параметров (Frick et al., *PRE*, 2006). Следующий шаг был сделан в задаче о дисковом динамо (Stepanov et al., *Astr.Nach.*2006; Степанов и др., *ВМСС*, 2008), в которой решались одномерные уравнения для крупномасштабных компонент поля (поперек галактического диска) и каскадные уравнения для мелкомасштабной МГД-турбулентности. В качестве примера приложения каскадных моделей к достаточно специальным случаям отметим модель холловской турбулентности (Frick et al., *MN*, 2003; Frick et al., *NJP*, 2007), которая может возникать в нейтронных звездах. Каскадная модель с нелокальными взаимодействиями была рассмотрена в работе (Plunian, Stepanov, *NJP*, 2007).

В последнее десятилетие усилия лаборатории в значительной мере были направлены на изучение роли спиральностей в турбулентных системах (обычной гидродинамической спиральности, перекрестной и магнитной спиральностей в МГД-системах). Имевшиеся каскадные модели в том или ином виде описывали

все интегралы движения, но спиральности разного знака были привязаны в них к различным ярусам (масштабам). Этот недостаток удалось преодолеть в новых «спиральных» каскадных моделях, написанных как для стандартной турбулентности (Степанов и др., МЖГ, 2009), так и для МГД-турбулентности (Мизева и др., ДАН, 2009). Именно с помощью этих моделей удалось исследовать роль спиральностей на поздних стадиях свободного вырождения МГД-турбулентности (Frick, Stepanov, EPL, 2010), влияние перекрестной спиральности на спектральный перенос (Мизева и др., ДАН, 2009), каскадные процессы во вращающейся МГД-турбулентности (Plunian, Stepanov, PRE, 2010), особенности диссипации спиральности (Lessinnes et al., PoF, 2011) и каскада спиральности во вращающихся потоках (Шестаков и др., ВМСС, 2012), каскад магнитной спиральности (Stepanov et al., МН, 2013). В работе (Stepanov et al., APJL, 2015) впервые рассмотрен независимый источник мелкомасштабной магнитной спиральности и показано, что даже флуктуации магнитной спиральности с нулевым средним могут обусловить обратный спектральный поток магнитной энергии и приводить к появлению в спектре эффекта бутылочного горлышка.

Полная история работ по каскадным моделям турбулентности, с упором на МГД-турбулентность, содержится в недавнем обзоре Plunian, Stepanov, Frick, Phys.Reports, 2013.

Исследования спиральностей не ограничились каскадными моделями. Выше уже упоминались спиральные механизмы генерации крупномасштабных вихрей. Эти механизмы были предложены по аналогии с механизмами генерации крупномасштабных магнитных полей. Именно попытки объяснения происхождения солнечного магнитного поля привели Ю. Паркера к мысли, что недостающий элемент динамо-цикла могут обеспечить спиральные (винтовые) конвективные вихри. Эта идея была доведена до статистической модели в рамках теории дина-

мо средних полей, основы которой были заложены работами М. Штеенбека, Ф. Краузе и К.-Х. Рэдлера (1966).

Для пермской турбулентной диаспоры подарком судьбы явилась возможность отправить в 1999 году стажера (Р. Степанова) к младшему представителю этой замечательной тройки, К.-Х. Рэдлеру, бывшему в эту пору директором института астрофизики в Потсдаме. Прямым результатом этой стажировки стала многолетняя работа, завершившаяся исчерпывающим анализом структуры турбулентных электродвижущих сил в потоке проводящей жидкости (Raedler, Stepanov, PRE, 2006). Вклад пермяков в теорию динамо оставим для главы о магнитной гидродинамике, хотя провести границу очень сложно, так как все реалистичные динамо развиваются в развитой турбулентной среде, а к важнейшим пермским результатам, относящимся к МГД-динамо, следует отнести первые лабораторные измерения турбулентных коэффициентов переноса магнитного поля (Stepanov et al., PRE, 2006; Frick et al., PRL, 2010; Noskov et al., PRE 2012). Здесь же коснемся только некоторых сугубо «спиральных» работ.

Многолетние исследования особенностей каскадных процессов в спиральной гидродинамической турбулентности (Степанов и др., МЖГ, 2009; Шестаков и др., ВМСС, 2012) завершились построением простой феноменологии спирального каскада в развитой турбулентности (Stepanov et al., PRL, 2015) и ее подтверждением в прямом численном моделировании (Kessar et al., PRE, 2015). Много усилий было направлено на разработку методов измерения спиральности в реальных турбулентных полях. В лабораторных гидродинамических экспериментах отработывались методики измерения спиральности по данным PIV измерений (Полудницин и др., «Гидродинамика», 2006). Для верификации различных моделей генерации космических магнитных полей очень важно научиться количественно оценивать спиральность наблюдаемых полей. На возможность идентификации

магнитной спиральности астрофизических полей по характеристикам радиоизлучения впервые было указано в работе (Волегова, Степанов, Письма ЖЭТФ, 2009), а методика оценки магнитной спиральности галактических магнитных полей по степени деполяризации радиоизлучения представлена в работе (Brandenburg, Stepanov, APJ, 2014).

В заключение вспомню еще раз своего учителя, Валерия Дмитриевича Зимина, и перескажу очень важную и часто повторяемую им мысль, актуальность которой сегодня стала еще более ясной. Состоит она в том, что широкое распространение коммерческих вычислительных пакетов, оснащенных встроенными моделями расчета мелкомасштабной турбулентности, кардинально расширило круг специалистов, за-

нимающихся расчетами турбулентных потоков для самых различных приложений. Сегодня, наверное, уже нет человека, который был бы в курсе всех турбулентных исследований и расчетов, проводимых даже в пределах одного крупного научного центра. Как всякое следствие прогресса, этот бурный рост рядов «турбуленщиков» имеет и плюсы, и минусы. Расчеты турбулентных течений перестали быть уделом узкого круга избранных – это хорошо. Турбулентные течения стали моделировать люди, не очень знакомые даже с феноменологией Колмогорова, – это не только плохо, но может быть и опасно, учитывая серьезность многих приложений, для расчета которых используются коммерческие пакеты. А познание турбулентности еще далеко не завершено.

#### Библиографический список

##### Книги

1. *Зимин В.Д., Фрик П.Г.* Турбулентная конвекция. – М.: Наука, 1988. 178 с.
2. *Фрик П.Г.* Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 332 с.

##### Обзоры

3. *Plunian F., Stepanov R., Frick P.* Shell Models of Magnetohydrodynamic Turbulence // *Physics Reports*, 2013. – Vol. 523. – №. 1. – P. 1.
4. *Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г.* Динамо на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту // *Успехи физических наук*, 2014. – Т. 184. – №. 3. – С. 313.
5. *Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Степанов Р.А.* Вейвлет-анализ пространственно-временной структуры физических полей // *Успехи физических наук*. 2022. – Т. 192. – № 1. – С. 69–99.

##### Статьи

6. *Антонов Т.Ю., Фрик П.Г., Соколов Д.Д.* Долговременная эволюция свободно распадающейся МГД-турбулентности // *Доклады РАН*. 2001. – Т. 377. – №. 2. – С. 170.
7. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Адвективные течения в плоском вращающемся слое проводящей жидкости // *Магнитная гидродинамика*, 1988. – №. 1. – С. 13.
8. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Крупномасштабная турбулентность в тонком слое неизотермической вращающейся жидкости // *Изв. АН СССР: МЖГ*, 1988. – №. 4. – С. 48.
9. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Крупномасштабная турбулентность в конвекции Релея-Бенара // *Изв. АН СССР: МЖГ*, 1989. – №. 5. – С. 43.
10. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Нелинейные эффекты взаимодействия конвективных вихрей и магнитного поля в тонком слое проводящей жидкости // *Магнитная гидродинамика*, 1990. – № 1. – С. 82.
11. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Нелинейные эффекты влияния экмановского слоя на динамику крупномасштабных вихрей в «мелкой воде» // *ПМТФ*, 1991. – № 2. – С. 49.
12. *Баранников В.А., Фрик П.Г., Шайдуров В.Г.* Спектральные характеристики двумерной турбулентной конвекции в вертикальной щели // *ПМТФ*, 1988. – №. 2. – С. 42.
13. *Баранников В.А., Богатырев Г.П., Зимин В.Д.* [и др.], Препр. ИМСС, 1982.
14. *Баталов В.Г., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* Экспериментальное исследование спиральных валов в адвективном потоке, натекающем на горячую горизонтальную поверхность // *Известия РАН: МЖГ*. 2007. – №. 4. – С. 39–49.
15. *Богатырев Г.П.* Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // *Письма в ЖЭТФ*, 1990. – Т. 51. – № 11. – С. 557.



16. *Богатырев Г.П., Гилев В.Г.* Надкритические конвективные движения в коротком горизонтальном цилиндре // Изв. АН СССР: МЖГ, 1980. – № 4. – С. 137.
17. *Богатырев Г.П., Гилев В.Г., Зимин В.Д.* Пространственно-временные спектры стохастических колебаний в гидродинамических системах // Письма в ЖЭТФ, 1980. – Т. 32. – № 3. – С. 229.
18. *Богатырев Г.П., Колесниченко И.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н.* Лабораторная модель процесса образования крупномасштабного вихря в конвективно-неустойчивой вращающейся жидкости // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 2006. – Т. 42. – № 4. – С. 460.
19. *Богатырев Г.П., Смородин Б.Л.* Физическая модель вращения тропического циклона // Письма в ЖЭТФ, 1996. – Т. 63. – № 1. – С. 25.
20. *Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешиников Д., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред, 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 469.
21. *Васильев А.Ю., Фрик П.Г.* Инверсии крупномасштабной циркуляции при турбулентной конвекции в прямоугольных полостях // Письма в ЖЭТФ, 2011. – Т. 93. – № 6. – С. 363.
22. *Васильев А.Ю., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Рогожкин С.А., Пахолков В.А.* Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // ЖТФ, 2015. – Т. 85. – № 9. – С. 45.
23. *Волегова А.А., Степанов Р.А.* Определение спиральности астрофизических магнитных полей по статистическим характеристикам радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ, 2009. – Т. 90. – № 10. – С. 707.
24. *Галягин Д.К., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Скейлинг геомагнитного поля и шкалы геомагнитной полярности // Доклады РАН, 1998. – Т. 360. – № 4. – С. 541.
25. *Галягин Д.К., Печерский Д.М., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Вейвлет-анализ характеристик геомагнитного поля в неогее // Изв. РАН: Физика Земли, 2000. – Т. 36. – № 4. – С. 82.
26. *Денисов С.А., Носков В.И., Соколов Д.Д., Фрик П.Г., Хрипченко С.Ю.* О возможности лабораторной реализации нестационарного МГД динамо // Доклады РАН, 1999. – Т. 365. – № 4. – С. 478.
27. *Денисов С.А., Носков В.И., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* Нестационарные турбулентные винтовые течения в кольцевом канале // Изв. РАН: МЖГ, 2001. – № 6. – С. 73.
28. *Денисов С.А., Носков В.И., Степанов Р.А., Фрик П.Г.* Измерения эффективной проводимости турбулентной проводящей жидкости // Письма в ЖЭТФ, 2008. – Т. 88. – № 3. – С. 198.
29. *Зимин В.Д.* Иерархическая модель турбулентности // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1981. – Т. 17. – № 12. – С. 1265.
30. *Зимин В.Д., Кетов А.И.* Надкритические конвективные движения в кубической полости // Изв. АН СССР: МЖГ, 1974. – № 5. – С. 110.
31. *Зимин В.Д., Кетов А.И.* Турбулентная конвекция в подогреваемой снизу кубической полости // Изв. АН СССР: МЖГ, 1978. – № 4. – С. 133.
32. *Зимин В.Д., Левина Г.В., Моисеев С.С., Тур А.В.* Возникновение крупномасштабных структур в подогреваемом снизу вращающемся слое на фоне турбулентной конвекции // Доклады Академии наук. 1989. – Т. 309. – С. 88.
33. *Зимин В.Д., Левина Г.В., Моисеев С.С., Старцев С.Е., Шварц К.Г.* Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 1996. – № 5. – С. 20.
34. *Зимин В.Д., Фрик П.Г., Шайдуров В.Г.* Турбулентная конвекция в кубической полости при одновременном подогреве сбоку и снизу // Изв. АН СССР. МЖГ, 1982. – № 2. – С. 147.
35. *Зимин В.Д., Шайдуров В.Г.* Неустойчивость конвективного пограничного слоя в замкнутой прямоугольной полости // Изв. АН СССР: МЖГ, 1975. – № 5. – С. 188.
36. *Казарян В.А., Тарунин Е.Л., Мызникова Б.И., Вертгейм И.И., Цыбульский П.Г.* Тепло- и массообмен в подземных резервуарах газонефтепродуктов. – М. – Ижевск: НИЦ «РХД», 2008. – 304 с.
37. *Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Павлинов А.М., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Шепелев С.Ф.* Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // Теплоэнергетика, 2015. – № 6. – С. 31.
38. *Левина Г.В., Моисеев С.С.* Эффект отрицательной турбулентной теплопроводности и его роль в образовании крупномасштабных структур // Письма в ЖТФ. 1998. – Т. 24. – № 8. – С. 67.
39. *Левина Г.В.* О параметризации спиральной турбулентности для численных моделей интенсивных атмосферных вихрей // Доклады РАН. 2006. – Т. 411. – № 3. – С. 400.
40. *Левина Г.В., Монтгомери М.Т.* О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза // Доклады РАН. 2010. – Т. 434. – № 3. – С. 401.
41. *Левина Г.В., Монтгомери М.Т.* Численная диагностика тропического циклогенеза на основе гипотезы о спиральной самоорганизации влажно-конвективной атмосферной турбулентности // Доклады РАН. 2014. – Т. 458. – № 2. – С. 214.

42. *Ложкин С.А., Фрик П.Г.* Инерционный интервал Обухова-Болджиано в каскадных моделях конвективной турбулентности // Известия РАН: МЖГ, 1998. – № 6. – С. 37.
43. *Ложкин С.А., Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Магнитное число Прандтля и мелкомасштабное МГД-динамо // Астрономический журнал, 1999. – Т. 76. – № 11. – С. 833.
44. *Мизева И., Степанов Р.А., Фрик П.Г.* Влияние перекрестной спиральности на каскадные процессы в МГД турбулентности // Доклады Академии Наук, 2009. – Т. 424. – № 4. – С. 479.
45. *Микишев А.Б., Фрик П.Г.* Перемежаемость в идеальной двумерной МГД-турбулентности // Магнитная гидродинамика, 1989. – № 1. – С. 135.
46. *Микишев А.Б., Фрик П.Г.* О спектральных законах в двумерном турбулентном потоке с линейным трением // Магнитная гидродинамика, 1990. – № 1. – С. 136
47. *Попова Е.Н., Фрик П.Г.* Крупномасштабные течения в турбулентном конвективном слое с погруженным в него подвижным теплоизолятором // Изв. РАН: МЖГ, 2003. – № 6. – С. 41.
48. *Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Каскадная модель турбулентности в быстро вращающейся сфере // Известия РАН: Серия физическая, 2003. – Т. 67. – № 3. – С. 300.
49. *Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Модель многомасштабного МГД-динамо // Астрономический журнал, 2003. – Т. 80. – № 6. – С. 556.
50. *Степанов Р.А.* Возбуждение крупномасштабного магнитного поля в галактическом диске, окруженном газовой короной // Астрономический журнал. 1999. – Т. 76. – № 4. – С. 243–247.
51. *Степанов Р.А., Чулин А.В., Фрик П.Г.* Винтовое динамо в торе // Вычислительная механика сплошных сред, 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 109.
52. *Степанов Р.А., Соколов Д.Д., Фрик П.Г.* Сопряжение уравнений среднего поля и каскадной модели мелкомасштабной турбулентности на примере задачи галактического динамо // Вычислительная механика сплошных сред, 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 97.
53. *Степанов Р.А., Фрик П.Г., Шестаков А.В.* О спектральных свойствах спиральной турбулентности // Известия РАН: МЖГ. 2009. – № 5. – С. 33.
54. *Теймуразов А.С., Васильев А.Ю., Фрик П.Г.* Двумерные и квазидвумерные расчеты турбулентной конвекции в вертикальных слоях // Вычислительная механика сплошных сред, 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 405.
55. *Теймуразов А.С., Фрик П.Г.* Численное исследование конвекции расплавленного магния в аппарате восстановления титана // Вычислительная механика сплошных сред, 2015. – Т. 8. – № 4. – С. 433.
56. *Фрик П.Г.* Иерархическая модель двумерной турбулентности // Магнитная гидродинамика, 1983. – № 1. – С. 60.
57. *Фрик П.Г.* Двумерная МГД-турбулентность. Иерархическая модель // Магнитная гидродинамика, 1984. – № 3. – С. 48.
58. *Фрик П.Г.* Моделирование каскадных процессов в двумерной турбулентной конвекции // ПМТФ, 1986. – № 2. – С. 71.
59. *Фрик П.Г., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д.* Каскадная модель турбулентности для жидкого ядра Земли // Доклады РАН, 2002. – Т. 387. – № 2. – С. 253.
60. *Шестаков А.В., Степанов Р.А., Фрик П.Г.* Влияние вращения на каскадные процессы в спиральной турбулентности // Вычислительная механика сплошных сред, 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 193.
61. *Antonov T., Lozhkin S., Frick P., Sokoloff D.* A shell model for free decaying MHD-turbulence and the role of the magnetic Prandtl number // Magnetohydrodynamics, 2001. – Vol. 37. – № 1–2. – P. 87.
62. *Aurell E., Boffetta G., Crisanti A., Frick P., Paladin G., Vulpiani A.* Statistical mechanics of shell model of 2D turbulence // Phys. Rev. E, 1994. – Vol. 50. – P. 4705.
63. *Aurell E., Dormy E., Frick P.* A binary tree-model of fully developed turbulence // Phys.Rev. E, 1997. – Vol. 56. – № 2. – P. 1692.
64. *Aurell E., Frick P., Shaidurov V.* Hierarchical tree-model of 2D turbulence // Physica D, 1994. – Vol. 72. – P. 95.
65. *Babiano A., Dubrulle B., Frick P.* Scaling properties of numerical 2D turbulence // Phys.Rev. E, 1995. – Vol. 52. – № 4. – P. 3719.
66. *Babiano A., Dubrulle B., Frick P.* Some properties of two-dimensional inverse energy cascade dynamics // Phys. Rev. E, 1997. – Vol. 55. – № 3. – P. 2693.
67. *Baliunas S., Frick P., Sokoloff D., Soon W.* Time scales and trends in the central England temperature data (1659–1990): a wavelet analysis // Geophysical Research Letters, 1997. – Vol. 24. – P. 1351.
68. *Baliunas S., Frick P., Moss D., Popova E., Sokoloff D., Soon W.* Anharmonic and standing dynamo waves: Theory and observation of stellar magnetic activity // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2006. – Vol. 365. – № 1. – P. 181.

69. *Batalov V., Sukhanovsky A., Frick P.* Laboratory study of differential rotation in a convective rotating layer // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 2010. – Vol. 104. – № 4. – P. 349–368.
70. *Bayandin D.V., Wertgeim I.I., Fainburg G.Z.* Mathematical modeling of turbulent free convective turbulence // *Heat Transfer Soviet Researches – Scripta Technica*, 1991. – Vol. 23. – № 1. – P. 204.
71. *Beck R., Frick P., Stepanov R., Sokoloff D.* Recognizing magnetic structures by present and future radio telescopes with Faraday rotation measure synthesis // *Astronomy and Astrophysics*, 2012. – Vol. 543. – A113.
72. *Brandenburg A., Stepanov R.* Faraday signature of magnetic helicity from reduced depolarization // *Astrophys.J.* 2014. – Vol. 786. – № 2. – C. 91.
73. *Dobler W., Frick P., Stepanov R.* The screw dynamo in a time-dependent pipe flow // *Phys. Rev. E*, 2003. Vol. 67. – P. 056309.
74. *Evgrafova A., Sukhanovskii A.* Specifics of heat flux from localized heater in a cylindrical layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019. – Vol. 135. – P. 761–768.
75. *Frick P., Aurell E.* On spectral laws in Shell Models of 2D turbulence // *EuroPhys. Letters*, 1993. – Vol. 24. – № 9. – P. 725.
76. *Frick P., Baliunas S., Galyagin D., Sokoloff D., Soon W.* Wavelet analysis of stellar chromospheric activity variations // *Astrophysical Journal*, 1997. – Vol. 483. – P. 426.
77. *Frick P., Beck R., Shukurov A., Sokoloff D., Ehle M., Kamphius J.* Magnetic and optical spiral arms in the galaxy NGC6946 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2000. – Vol. 318. – № 3. – P. 925.
78. *Frick P., Beck R., Berkhuijsen E., Patrikeyev I.* Scaling and correlation analysis of galactic images // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2001. – Vol. 326. – № 4. – P. 1145.
79. *Frick P., Boffetta G., Giuliani P., Lozhkin S., Sokoloff D.* Long-time behaviour of MHD shell models // *Europhys. Letters*, 2000. – Vol. 52. – № 2. – P. 539.
80. *Frick P., Denisov S., Noskov V., Stepanov R.* Direct Measurement of Effective Magnetic Diffusivity in Turbulent Flow of Liquid Sodium // *Phys. Rev. Letters*, 2010. – Vol. 105. – № 18. – P. 184502.
81. *Frick P., Denisov S., Noskov V., Pavlinov A., Stepanov R.* Magnetic field in a decaying spin-down flow of liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*, 2015. – Vol. 51. – № 2. – P. 267.
82. *Frick P., Dubrulle B., Babiano A.* Scaling properties of a class of shell models // *Phys. Rev. E*, 1995. – Vol. 51. – № 6. – P. 5582.
83. *Frick P., Galyagin D., Hoyt D., Nesme-Ribes E., Shatten K., Sokoloff D., Zakharov V.* Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups // *Astronomy and Astrophysics*, 1997. – Vol. 328. – P. 670.
84. *Frick P., Grossmann A., Tchamichian Ph.* Wavelet analysis of signals with gaps // *Journal of Mathematical Physics*, 1998. – Vol. 39. – № 8. – P. 4091.
85. *Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S.* Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // *EuroPhysical Letters*, January 2015. – Vol. 109. – P. 14002.
86. *Frick P., Khripchenko S., Denisov S., Sokoloff D., Pinton J.-F.* Effective magnetic permeability of a turbulent fluid with macroferroparticles // *Euro. Phys. Journal B.* 2002. – Vol. 25. – P. 399.
87. *Frick P., Noskov V., Denisov S., Khripchenko S., Sokoloff D., Stepanov R., Sukhanovsky A.* Non-stationary screw flow in a toroidal channel: way to a laboratory dynamo experiment // *Magnetohydrodynamics*, 2002. – Vol. 38. – № 1–2. – P. 136.
88. *Frick P., Noskov V., Denisov S., Stepanov R.* Turbulent spin-down flow of liquid sodium in a thick torus // *Magnetohydrodynamics*, 2012. – Vol. 48. – № 1. – P. 31.
89. *Frick P., Reshetnyak M., Sokoloff D.* Combined grid-shell approach for convection in a rotating spherical layer // *EuroPhys.Lett.*, 2002. – Vol. 59. – № 2. – P. 212.
90. *Frick P., Sokoloff D.* Cascade and dynamo action in a shell model of MHD-turbulence // *Phys. Rev. E*, 1998. – Vol. 57. – № 4. – P. 4155.
91. *Frick P., Sokoloff D., Stepanov R., Pipin V., Usoskin I.* Spectral characteristic of mid-term quasi-periodicities in sunspots data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2020. – Vol. 491. – P. 5572–5578.
92. *Frick P., Soon W., Popova E., Baliunas S.* Time-spectra of chromospheric activity of old solar-type stars: Detection of rotational signals from Double Wavelet Analysis // *New Astronomy*, 2004. – Vol. 9. – P. 599.
93. *Frick P., Stepanov R., Shukurov A., Sokoloff D.* Structures in the rotation measure sky // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2001. – Vol. 325. – № 2. – P. 649.
94. *Frick P., Stepanov R.* Long term force-free evolution of MHD turbulence // *EuroPhys. Letters*, 2010. – Vol. 92. – P. 34007.
95. *Frick P., Stepanov R., Nekrasov V.* Shell-model of magnetic field evolution under Hall effect // *Magnetohydrodynamics*, 2003. – Vol. 39. – № 3. – P. 327.

96. *Frick P., Stepanov R., Reinhardt M.* Shell models for Hall effect induced magnetic turbulence // *New Journal of Physics*, 2007. – Vol. 9. – № 3. – P. 293.
97. *Frick P., Stepanov R., Sokoloff D.* Large-small scales interactions and quenching in alpha-square dynamo // *Phys.Rev. E*, 2006. – Vol. 74. – P. 066310.
98. *Frick P., Stepanov R., Sokoloff D., Beck R.* Wavelet based Faraday Rotation Measure Synthesis // *Mon. Not. R. Astron. Soc. Letters*, 2010. – Vol. 401. – L24.
99. *Frick P., Stepanov R., Sokoloff D., Beck R.* Faraday Rotation Measure Synthesis for Magnetic Fields of Galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2011. – Vol. 414. – № 3. – P. 2540.
100. *Frick P., Stepanov R., Beck R., Sokoloff D., Shukurov A., Ehle M., Lundgren A.* Magnetic and gaseous arms in M83 // *Astronomy and Astrophysics*, 2016. – Vol. 585. – A21.
101. *Kessar M., Balarac G., Plunian F., Stepanov R.* Non-Kolmogorov cascade of helicity-driven turbulence // *Phys. Rev. E*, 2015. – Vol. 92. – № 3. – P. 031004.
102. *Khalilov R., Kolesnichenko I., Pavlinov A., Mamykin A., Shestakov A., Frick P.* Thermal convection of liquid sodium in inclined cylinders // *Phys.Rev.Fluids*, 2018. – Vol. 3. – № 4. –P. 043503.
103. *Kolesnichenko I., Frick P.* Conducting fluid flow in helical magnetic field // *Magnetohydrodynamics*, 2009. – Vol. 45. – № 2. – P. 165.
104. *Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., Frick P., Kapusta A., Mikhailovich B.* The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and travelling magnetic fields // *Experiments in Fluids*, 2015. – Vol. 56. – P. 88.
105. *Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P.* ICMM two circuit sodium facility // *Magnetohydrodynamics*, 2016. – Vol. 52. – № 1.
106. *Lessinnes T., Carati D., Plunian F., Stepanov R.* Dissipation scales of kinetic helicities in turbulence // *Physics of Fluids*. 2011. – Vol. 23. – № 3. – P. 035108-6.
107. *Levina G.V., Starkov M.V., Startsev S.E., Zimin V.D., Moiseev S.S.* Modelling of Large-Scale Structures Arising Under Developed Turbulent Convection In a Horizontal Fluid Layer, Nonlinear Processes in Geophysics. 2000. – Vol. 7. – № 1–2. – C. 49.
108. *Mamykin A., Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pakholkov V., Rogozhkin S., Vasiliev A.* Turbulent convective heat transfer in an inclined tube with liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*, 2015. – Vol. 51. – № 2. – P. 329.
109. *Moss D., Stepanov R., Arshakian T.G., Beck R., Krause M., Sokoloff D.* Multiscale magnetic fields in spiral galaxies: evolution and reversals // *Astronomy and Astrophysics*. 2012. – Vol. 537. – P. A68.
110. *Moss D., Beck R., Krause M., Sokoloff D., Stepanov R., Arshakian T.G.* The relation between magnetic and material arms in models for spiral galaxies // *Astronomy and Astrophysics*. 2013. – Vol. 556. – P. A147.
111. *Moss D., Stepanov R., Krause M., Beck R., Sokoloff D.* The formation of regular interarm magnetic fields in spiral galaxies // *Astronomy and Astrophysics*. 2015. – Vol. 578. – P. A94.
112. *Nesme-Ribes E., Frick P., Sokoloff D., Zakharov V., Ribes J-C., Vigouroux A., Laclare F.* Wavelet analysis of Maunder minimum as recorded in Solar diameter data // *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 1995. – Vol. 321. – P.525.
113. *Noskov V., Denisov S., Frick P., Khripchenko S., Sokoloff D., Stepanov R.* Magnetic field rotation in the screw gallium flow // *Eur.Phys.J. B*, 2004. – Vol. 41. – P. 561.
114. *Noskov V., Stepanov R., Denisov S., Frick P., Verhille G., Plihon N., Pinton J-F.* Dynamics of a turbulent spin-down flow inside a torus // *Physics of Fluid*, 2009. – Vol. 21. – № 4. – P. 045108.
115. *Noskov V., Denisov S., Stepanov R., Frick P.* Turbulent viscosity and turbulent magnetic diffusivity in decaying spin-down flow of liquid sodium // *Phys. Rev. E*, 2012. – Vol. 85. – P. 016303.
116. *Patrikeyev I., Fletcher A., Stepanov R., Beck R., Berkhuijsen E., Frick P., Horellou C.* Analysis of spiral arms using anisotropic wavelets: gas, dust and magnetic fields in M51 // *Astronomy and Astrophysics*, 2006. – Vol. 458. – P. 441.
117. *Plunian F., Stepanov R.* A non-local shell model of hydrodynamic and magnetohydrodynamic turbulence // *New Journal of Physics*. 2007. – Vol. 9. – P. 294.
118. *Plunian F., Stepanov R.* Cascades and dissipation ratio in rotating magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Prandtl number // *Phys. Rev. E*. 2010. – Vol. 82. – № 4. – C. 046311.
119. *Rädler K.H., Stepanov R.* Mean electromotive force due to turbulence of a conducting fluid in the presence of mean flow // *Phys. Rev. E*. 2006. – Vol. 73. – № 5. – P. 379.
120. *Rädler K.H., Stepanov R.* On the effects of turbulence on a screw dynamo // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2006. – Vol. 100. – № 4–5. –P. 379.
121. *Shukurov A., Stepanov R., Sokoloff D.* Dynamo action in Moebius flow // *Phys. Rev. E* 2008. – Vol. 78. – P. 025301.
122. *Soon W., Frick P., Baliunas S.* Lifetime of surface features and stellar rotation: A wavelet time-frequency approach // *Astrophysical Journal Letter*, 1999. – Vol. 510. – № 2. – L135.

123. *Stepanov R., Arshakian T., Beck R., Frick P., Krause M.* Magnetic field structures of galaxies derived from analysis of Faraday rotation measures, and perspectives for the SKA // *Astron. and Astrophysics*, 2008. – Vol. 480. – P. 45.
124. *Stepanov R., Frick P., Mizeva I.* Cross helicity and magnetic helicity cascades in MHD turbulence // *Magnetohydrodynamics*, 2013. – Vol. 49. – № 1–2. – P. 15.
125. *Stepanov R., Frick P., Mizeva I.* Joint inverse cascade of magnetic energy and magnetic helicity in MHD turbulence // *Astrophysical Journal Letters*, 2015. – Vol. 798. – L35.
126. *Stepanov R., Frick P., Sokoloff D.* Multi-scale disk dynamo model // *Astron. Nachrichten*, 2006. – Vol. 327. – № 5–6. – P. 481.
127. *Stepanov R., Golbraikh E., Frick P., Shestakov A.* Hindered energy cascade in highly helical isotropic turbulence // *Physical Review Letters*, 2015. – Vol. 115. – P. 234501.
128. *Stepanov R., Plunian F.* Fully developed turbulent dynamo at low magnetic Prandtl numbers // *Journal of Turbulence*. 2006. – T. 7. – C. 1.
129. *Stepanov R., Plunian F.* Phenomenology of turbulent dynamo growth and saturation // *The Astrophysical Journal*. 2008. – T. 680. – № 1. – C. 809.
130. *Stepanov R., Shukurov A., Fletcher A., Beck R., Porta L.L., Tabatabaei F.* An observational test for correlations between cosmic rays and magnetic fields // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2014. – T. 437. – № 3. – P. 2201.
131. *Stepanov R., Volk R., Noskov V., Denisov S., Frick P., Pinton J.-F.* Induction, helicity and alpha effect in a toroidal screw flow of liquid gallium // *Phys. Rev. E*, 2006. – Vol. 73. – P. 046310.
132. *Sukhanovsky A., Frick P., Teymurazov A., Batalov V.* Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // *Eur.Phys.J. B*, 2012. – Vol. 85. – P. 9.
133. *Sukhanovskii A., Popova E.* The Importance of Horizontal Rolls in the Rapid Intensification of Tropical Cyclones // *Boundary-Layer Meteorology*, 2020. – Vol. 175. – P. 259–276.
134. *Sun X.H., Stepanov R.* [et al.] Comparison of algorithms for determination of rotation measure and faraday structure // *Astronomical Journal*, 2015. – T. 149. – № 2. – P. 60.
135. *Teimurazov A., Frick P.* Thermal convection of liquid metal in a long inclined cylinder // *Physical Review Fluids*, 2017. – Vol. 2. – № 11. – 113501.
136. *Vasiliev A., Frick P., Kumar A., Stepanov R., Sukhanovskii A., Verma M.* Transient flows and reorientations of large-scale convection in a cubic cell // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019. – Vol. 108. – P. 104319.
137. *Vasiliev A., Sukhanovskii A., Frick P., Budnikov A., Fomichev V., Bolshukhin M., Romanov R.* High Rayleigh number convection in a cubic cell with adiabatic sidewalls // *Int.J.Heat and Mass Transfer*, 2016. – Vol. 102. – P. 201–212.
138. *Zimin V., Hussain F.* Wavelet based model for small-scale turbulence // *Physics of Fluids*, 1995. – Vol.7. – № 12. – P. 2925.
139. *Zimin V.D., Startsev S.E., Shaidurov V.G., Moiseev S.S.* Modeling of large-scale vortical processes in a rotating layer heated from below, *Chaos* (Woodbury, N.Y.). 1991. – Vol. 1. – № 2. – P. 232.
140. *Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Mandrykin S., Pavlinov A., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O.* The influence of the cell inclination on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // *Journal of Fluid Mechanics*, 2020. – Vol. 884. – P. A18.

**FORMATION OF TURBULENCE RESEARCH IN PERM  
(in memory of Valery Dmitrievich Zimin)**

P.G. Frick

*Institute of Continuum Media Mechanics UB RAS*

**For citation:**

*Frick P.G.* Formation of turbulence research in Perm (in memory of Valery Dmitrievich Zimin) // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2023. – № 2. – P. 81–94. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.2.8>

Valery Dmitrievich Zimin worked in the Laboratory of Physical Hydrodynamics at ICMM UB RAS from its foundation in 1971 until 1990 and played a very important role in shaping the scientific topics of the Laboratory. The paper gives a retrospective analysis of the laboratory's

work in the field of turbulent flow research with an emphasis on V.D. Zimin's original ideas, which determined the directions of the laboratory's work, developed up to the present day. Such directions include hierarchical and shell models of turbulence, wavelet analysis of various physical systems, space-time analysis of turbulent flows and investigation of helical large-scale vortices and helical small-scale turbulence.

*Keywords: turbulence, turbulence models, wavelet analysis, large-scale circulation, helicity.*

**Сведения об авторе**

*Фрик Петр Готлобович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, Академика Королева, 1; e-mail: frick@icmm.ru.*

*Материал поступил в редакцию 13.03.2023 г.*